УДК 556.53:502.654

ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ МЕТОДОВ УЛУЧШЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭВТРОФНЫХ ВОДОЕМОВ

А.Н. Попов

ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург

На примере конкретного водного объекта показано, что выбор метода улучшения состояния водоема должен базироваться, во первых, на определенных общих методологических подходах к рассматриваемой проблеме, понимании сущности внутриводоемных процессов, балансе веществ и информации о состоянии водной экосистемы объекта.

Среди возможных вариантов улучшения состояния зарастающих озер зачастую предлагается один из видов биоманипуляции, суть которого состоит в заселении в водоем растительноядных рыб (в частности, белого амура). Действительно, растительноядные рыбы могут решить вопрос снижения зарастаемости водного объекта, однако при этом возникают проблемы экосистемного характера, связанные не только с изменением рыбного стада и его пищевой базы, но и с изменением круговорота биогенных веществ. Последнее может привести к крайне негативным последствиям, поэтому в каждом конкретном случае вопрос проведения указанной биоманипуляции должен рассматриваться индивидуально.

Рассмотрим данный вопрос на примере конкретного водоема — оз. Шарташ, находящегося на территории г. Екатеринбурга и являющегося интенсивно используемым в целях водных рекреаций.

Озеро расположено на восточной окраине города Екатеринбурга. Площадь зеркала — 7,4 км^2, площадь водосбора — 5,6 км^2, средняя глубина — 3,0 м, максимальная — 4,5 м, объем воды — 21,6 млн м^3, объем сапропеля — 19 млн м^3. Вода в озере по гидрохимическим критериям пресная и мягкая, карбонатно-кальциевая.

Возраст озера составляет приблизительно 10 000 лет, т. е. оно достаточно «пожилое». Поэтому (как практически для всех «пожилых» водоемов) для него характерны зарастание акватории погруженной высшей водной растительностью и интенсивное цветение водорослей. Озеро эвтрофное, причем существует некая зависимость процессов эвтрофирования от протекания весны: после короткой бурной весны преобладают процессы цветения, после затяжной — зарастания. При «среднестатистической» весне для озера характерны и то, и другое.

Концентрация фитопланктона в озере в летний, наиболее показательный период, колеблется в пределах от 2 до 40 мг/дм^3, в зимний период — 0,1—0,5 мг/дм^3. При этом в период «цветения» водорослей происходит повышение величины pH до 9,5—10. Возникают и заморные явления.

Оба процесса проявления эвтрофирования ведут к тому, что рекреационный потенциал озера постепенно теряется. В настоящее время стоит вопрос об улучшении состояния данного водного объекта, в связи с чем в некоторых научных и проектных организациях г. Екатеринбурга рассматривается вопрос о заселении озера травоядными рыбами (белый амур). Вариант подкупает сравнительной дешевизной и возможностью получения товарной рыбы, отличающейся высокими питательными качествами. Более того, в области финансируются работы, направленные на исследование возможности заселения этой рыбы в водоемы-охладители электростанций с целью освобождения их от растительности и получения рыбной продукции.

При рассмотрении возможности заселения белого амура в озеро Шарташ возникает ряд вопросов, от решения которых зависит стратегия организации восстановительных работ на озере, поскольку положительный ответ даст возможность избежать (хоть и временно) проведение весьма капиталоемких работ (например, очистки озера от сапропеля).

В частности возникает вопрос об интенсивности цветения озера после заселения растительноядных рыб, поскольку это в значительной мере будет определять рекреационную значимость водоема.

Немаловажен и вопрос об изменении гидрохимических показателей воды озера, т.к. с фекалиями рыб в воду поступают практически все вещества, содержащиеся в поедаемых ими растениях. Известны факты, свидетельствующие, что в карповых прудах с подкормкой (белый амур относится к семейству карповых) формируется качество воды, непригодное для рекреационного использования. Такие объекты характеризуются повышенным содержанием органического вещества и соединений азота, а также опасной для человека микрофлорой, средой размножения для которой служат поступающие с фекалиями рыб вещества. Трофический статус таких водоемов при этом повышается и в определенные периоды возникает необходимость их промывки.

В случае заселения белого амура озеро превращается, по сути, в рыбоводный пруд с приличной кормовой базой (до 30 тыс. т высших водных растений).

Очевиден вопрос и о судьбе местного рыбного стада, поскольку, выедая растительность, белый амур разрушает нерестилища некоторых местных видов рыб.

Таким образом, возникает ряд вопросов экосистемного характера, определяющих возможность проведения указанной биоманипуляции в оз. Шарташ.

Ниже представлены результаты исследований, в той или иной степени отвечающих на поставленные вопросы.

В работе использованы результаты ранее проведенных работ, литературная информация и результаты лабораторного и натурного моделирования.

Оценка влияния заселения белого амура в оз. Шарташ на интенсивность «цветения» водорослей

Количество высшей водной растительности в период проведения наблюдений в озере в вегетационный период составляло 30 000 т (сырой биомассы).

Как уже упоминалось выше, гидробиологическое состояние озера Шарташ в настоящее время весьма неудовлетворительно, что является заметным препятствием его полноценного рекреационного использования. Озеро зарастает погруженной высшей водной растительностью, интенсивно «цветет», особенно в наиболее напряженные в рекреационном отношении периоды.

«Цветение» водорослей и зарастание озера определяется потоком биогенных веществ в воду водоема, содержанием их в донных отложениях, прогреваемостью, средней глубиной, временем водообмена, активностью фауны, в частности рыб.

При вселении травоядных рыб из всех перечисленных факторов в озере изменится распределение потока биогенов, что обязательно скажется на продукционных процессах. Кроме того, изменится конкурентное соотношение между водорослями и высшими водными растениями, т. к. исчезнет часть биомассы водных растений — конкурентов за питательные вещества. Изменится и количество доступных для водорослей биогенов за счет трансформации части растений травоядными рыбами в фекалии. Это может привести к увеличению продуцируемой биомассы водорослей.

Рассчитаем изменение потока биогенов (в нашем случае это «общий фосфор») в озере в случае заселения белого амура.

Обработка результатов натурного обследования оз. Шарташ, представленных в [1], показала, что общий поток фосфора в озеро состоит из следующих составляющих:

$П_{св}$ — поток с суши равен 0,237 гР/м^{2}год;

$П_{дв1}$ — поток из донных отложений в воду, обусловленный окислением стойкого органического вещества, равен 0,096 гР/м^{2}год;

$П_{дв2}$ — поток из донных отложений в воду, обусловленный окислением нестойкого органического вещества планктонного происхождения на дне, равен 0,014 гР/м^{2}год;

$П_{дв3}$ — поток из донных отложений в воду, обусловленный окислением нестойкого органического вещества макрофитного происхождения, равен 0,792 гР/м^{2}год;

$П_{дм}$ — поток фосфора из донных отложений в макрофиты равен 0,923 гР/м^{2}год. Общий суммарный поток фосфора в озеро составляет 2,06 гР/м^{2}год, что выше критического для водоема (граница перехода из мезотрофного в эвтрофное состояние) в 20 раз.

Для верификации оценки потока фосфора из донных отложений в воду и оценки изменений, связанных с возможной трансформацией состава донных отложений за последние 22 года, был проведен лабораторный эксперимент с сапропелем, взятым из озера. Цель эксперимента — оценка поступления фосфора из донных отложений в водную среду. Эксперимент проведен в условиях летней межени непосредственно на озере.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: аквариум с затемненными стенками без дна (изолят) помещался в озеро Шарташ, отсекая часть донных отложений. Пробы воды отбирались через сутки. Длительность эксперимента — 20 дней. Площадь дна изолята — 1 м^2, емкость — 1 м^3. Объем воды в изоляте — 0,5 м^3. Сверху изолят закрывался непрозрачной затемненной крышкой во избежание «цветения» фитопланктона. Эксперимент проведен в двух повторностях. Изоляты в озере размещались на расстоянии 500 м друг от друга. Точки выбирались таким образом, чтобы глубина участка с заиленным дном не превышала 1 метра. Результаты эксперимента представлены в табл. 1 и 2.

Результаты эксперимента показали, что за 20 дней из донных отложений в воду поступило: изолят № 1 — (500 · 0,224—500 · 0,120) — 52 мг общего фосфора; изолят № 2 — (599 · 0,196—500 · 0,102) — 47 мг общего фосфора. В пересчете на поток фосфора из донных отложений в воду в год это составляет: изолят № 1 — (0,052 : 20 · 365) — 0,949 гР/м^2 год; изолят № 2 — (0,047 : 20 · 365) — 0,857 гР/м^{2}год. Среднее между двумя экспериментально полученными значениями составляет 0,903 гР/м^{2}год. Результаты аналогичных исследований в 1981 г. дали поток общего фосфора из донных отложений в воду — 0,902 гР/м^2 год, т. е. имеем весьма близкие значения. Для расчетов воспользуемся результатами работ, проводившихся в 1981 г., поскольку они получены при обработке более значительных массивов данных (результаты более десяти экспериментов).

Таблица 1. Изменение концентрации общего фосфора в воде изолята в период проведения эксперимента (точка № 1)

Время от начала экспозиции, сут.	*Концентрация общего фосфора, мг/дм³*	*Время от начала экспозиции, сут.*	*Концентрация общего фосфора, мг/дм³*
0	0,120	11	0,178
1	0,120	12	0,180
2	0,121	13	0,184
3	0,126	14	0,189
4	0,136	15	0,193
5	0,140	16	0,198
6	0,147	17	0,205
7	1,151	18	0,210
8	0,155	19	0,220
9	0,160	20	0,224
10	0,162	—	—

Таблица 2. Изменение концентрации общего фосфора в воде изолята в период проведения эксперимента (точка № 2)

Время от начала экспозиции, сут.	*Концентрация общего фосфора, мг/дм³*	*Время от начала экспозиции, сут.*	*Концентрация общего фосфора, мг/дм³*
0	0,102	11	0,134
1	0,100	12	0,149
2	0,106	13	0,150
3	0,107	14	0,155
4	0,110	15	0,162
5	0,110	16	0,170
6	0,112	17	0,178
7	1,118	18	0,185
8	0,121	19	0,190
9	0,124	20	0,196
10	0,128	—	—

Предположим, что зарыбление планируется для снижения биомассы водных растений в 2 раза. Расчет произведем на максимальную биомассу растений за наблюдаемый период — 30 тыс. т (в сырой массе), т. е. допускаем, что рыба (белый амур) съела 15 тыс. т растительности. Кормовой коэффициент для белого амура равен 30, т. е. при поедании 30 кг корма привес составит 1 кг массы рыбы. Следовательно, 29 кг корма в переработанном виде поступят в воду.

В этом случае поток фосфора из донных отложений в макрофиты уменьшится в 2 раза и составит 0,4615 гР/м^{2}год. При полном удалении 50 % растительности (конкурента за питание) произойдет снижение потока фосфора из донных отложений в биомассу растений, но увеличится доля фосфора, которая будет поглощаться фитопланктоном из воды, на величину, равную количеству фосфора, поглощаемого погруженными водными растениями непосредственно из водной среды. Это приведет к увеличению биомассы, продуцируемой фитопланктоном. Таким образом, следует ожидать интенсификации цветения.

Но при поедании растений рыбой, т. е. при неполном их удалении, с фекалиями рыбы в воду будет еще поступать поток наиболее доступного к усвоению растительностью и водорослями фосфора. Этот поток будет примерно равен (при условии 100 %-го поступления в воду фосфора, содержащегося в фекалиях) — 0,44 гР/м^{2}год. То есть формируется ситуация, при которой часть растительности, как конкурирующей за питание, изымается, а фосфор, входящий в состав изымаемой биомассы, переводится в воду в легкоусвояемой форме.

Если учесть, что поток доступного для фитопланктона фосфора составляет в настоящее время 1,137 гР/м^{2}год [1], то добавка в виде доступного фосфора фекалий составит 38 % от существующего.

Добавку доступного фосфора в воде за счет снижения конкурентноспособности растений (в результате их удаления) можно рассчитать исходя из предположения, что половина этого компонента погруженными растениями поглощается из воды. Содержание фосфора в макрофитах составляет 0,004 г/г сухого органического вещества. Таким образом, выедание половины растительности (1500 тонн сухого вещества, при условии, что в озере сырая биомасса растений составляет 30 000 тонн) снизит поглощение фосфора из воды на 3000 кг, т. е. произойдет добавка концентрации компонента на 0,14 мг/дм^3, что составит 37 % от средней концентрации фосфора в водоеме.

Очевидно, что следует ожидать повышение средних и максимальных биомасс фитопланктона в озере минимум на 75—80 %.

Вселение рыбы с расчетом снижения биомассы растительности менее чем на 50 % не представляется целесообразным даже с точки зрения наведения «косметического» эффекта на акватории озера. Но и в этом случае следует ожидать интенсификации «цветения» водорослей, т. е. ухудшения рекреационных свойств водоема.

Если же вселять растительноядную рыбу с расчетом выедания 100 % высших водных растений, то следует ожидать интенсификации «цветения» водорослей минимум в 2,5 раза.

Явление интенсификации «цветения» водорослей наблюдалось на Верхне-Тагильском водохранилище после вселения в него белого амура для очистки акватории охладителя от высшей водной растительности.

В условиях озера Шарташ (учитывая его малую проточность) это явление грозит существованию отдельных звеньев биоты, поскольку интенсивное цветение с последующим отмиранием биомассы фитопланктона приводит к дефициту кислорода даже в летние периоды, что ведет к заморным явлениям, это наблюдалось на ряде водоемов Свердловской области (например, на Белоярском водохранилище, оз. Шарташ в 1981 г.).

Прогноз изменения гидрохимических показателей воды озера Шарташ при вселении в него растительноядной рыбы (белого амура)

Учитывая, что кормовой коэффициент у белого амура равен 30, при его вселении в озеро Шарташ значительная часть остатков съеденных растений (96,7 %) поступит в водную массу в виде рыбных фекалий.

Известно, что при утилизации биомассы растений звеньями гидробиоценоза происходит изменение гидрохимического состава воды водоема за счет поступления в воду различных веществ, выделяемых гидробионтами-утилизаторами высших водных растений в процессе жизнедеятельности.

В нашем случае дело будем иметь с переработанными остатками высших водных растений, поступающих в озеро в виде фекалий. Поскольку необходимые переходные коэффициенты для вычисления количества вещества, переходящего в воду при окислении фекалий, не известны, примем, что в воде окисляется биомасса отмерших макрофитов. Общее количество ингредиентов в фекалиях и биомассе растений практически близки, учитывая кормовой коэффициент белого амура.

Переходные коэффициенты для расчета количества вещества, переходящего в воду при окислении органического вещества растений, приняты согласно [2] и представлены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты для вычисления количества вещества, переходящего в воду при окислении органического вещества растений, ($\times 10^{-3}$ кг/кг сухой массы)

Группа растений	*C*	$N_{орг}$	*ПО*	*БО*	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	$P_{вал}$	PO_4^{3-}
	24,7	3,5	16,5	54,3	6,2	0,08	0,13	1,65	0,15

Примечание: С — органический углерод, ПО — перманганатная окисляемость, БО — бихроматная окисляемость, мгO_2/дм^3.

Таблица 4. Количество ингредиентов, которое поступит в воду оз. Шарташ при выедании белым амуром половины максимально принятой биомассы водных растений (тонн)

С	$N_{орг}$	*ПО*	*БО*	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	$P_{вал}$	PO_4^{3-}
37,05	5,25	34,75	81,45	9,3	0,12	0,195	2,46	0,225

Таблица 5. Увеличение концентрации некоторых ингредиентов при выедании белым амуром половины биомассы высших водных растений (мг/дм³)

С	$N_{орг}$	*ПО*	*БО*	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	$P_{вал}$	PO_4^{3-}
1,74	0,24	1,17	3,90	0,441	0,006	0,009	0,117	0,012

Таблица 6. Количество ингредиентов, которое поступит в воду оз. Шарташ при выедании белым амуром 100 % максимально принятой биомассы высших водных растений (тонн)

С	$N_{орг}$	*ПО*	*БО*	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	$P_{вал}$	PO_4^{3-}
74,1	10,5	69,5	162,9	18,6	0,24	0,390	4,92	0,420

Таблица 7. Увеличение концентрации некоторых ингредиентов при выедании белым амуром 100 % биомассы высших водных растений (мг/дм³)

С	$N_{орг}$	*ПО*	*БО*	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	$P_{вал}$	PO_4^{3-}
3,48	0,48	2,34	6,80	0,882	0,012	0,018	0,234	0,024

Отношение «сухое вещество / мокрое» принято в соответствии с [3], как 1:10.

Учитывая, что белый амур будет питаться только в вегетационный период, то поступление ингредиентов из фекалий рыб произойдет в сравнительно короткий отрезок времени, что может вызвать сравнительно интенсивное повышение концентрации ингредиентов.

В связи с этим при окислении 1500 тонн сухого органического вещества (15 тыс. тонн мокрого) в воду оз. Шарташ поступит минимум тонн (см. табл. 4), концентрация указанных ингредиентов в воде озера увеличится (объем воды в озере принят 21 млн м³, см. табл. 5).

При выедании белым амуром 100 % биомассы высших водных растений в воду поступит минимум (см. табл. 6).

В табл. 7 представлены данные о повышении концентрации некоторых ингредиентов за счет их поступления в воду оз. Шарташ при окислении биомассы высших водных растений при 100 %-м их выедании белым амуром.

В целом получается, что при 50 %-м выедании белым амуром высшей водной растительности в воде озера заметно увеличится содержание аммонийного азота и органических веществ (перманганатная и бихроматная окисляемости).

Максимально наблюдаемая концентрация аммонийных ионов в период с 1996 по 2000 гг. составляла 2,4 мг/дм^3. Следовательно, при 50 %-м выедании высшей водной растительности максимальная концентрация аммонийных ионов может увеличиться до 2,8 мг/дм^3.

Максимально наблюдаемая концентрация органического вещества (бихроматная окисляемость) в период с 1996 по 2000 гг. составляла 50,0 мг/дм^3. При 50 %-м выедании высшей водной растительности максимальная концентрация органических веществ (ХПК) может увеличиться до 53,9 мг/дм^3.

При 100 %-ном выедании высшей водной растительности эти показатели составят:

максимальная концентрация аммония — 3,28 мг/дм^3, максимальная величина ХПК — 56,8 мг/дм^3;

ПДК рыбохозяйственная для аммония — 0,5 мг/дм^3, ПДК для аммония в водоемах хозпитьевого водоснабжения — 1,92 мг/дм^3.

Озеро Шарташ относится к рыбохозяйственным водоемам 2-й категории. Получаемое приращение концентрации ионов аммония даже при 50 %-м выедании травы приближается к величине ПДК рыбохозяйственной.

Возможное влияние вселения белого амура в озеро Шарташ на состояние местного рыбного стада

Белый амур не является конкурентом за питание местным видам рыб, поскольку в озере Шарташ растительноядные рыбы не обитают. Его влияние при 50 %-м выедании водной растительности не скажется на жизнедеятельности других видов рыб.

При 100 %-м выедании высших водных растений будут нарушены места нерестилищ местных видов рыб (заросшие растительностью мелководья), что приведет к их постепенному исчезновению из озера.

Таким образом, расчеты, обоснованные результатами длительных исследований, показывают, что заселение растительноядных рыб (белого амура) в оз. Шарташ приведет к интенсификации (по отношению к современному) «цветения» водорослей в озере (от 1,5 до 2,5 раз) и заметному увеличению в воде водоема концентрации соединений аммония и органических веществ.

Все это ухудшит (по отношению к современному состоянию) гидробиологическое и гидрохимическое состояние водоема. В этом случае

не решается основная задача биоманипуляции — улучшение качества воды в озере, снижение интенсивности его цветения и повышение водохозяйственных и рекреационных свойств водного объекта. Экологическое состояние объекта, наоборот, усугубляется.

В связи с этим напрашивается однозначный вывод — вселение растительноядных рыб (белого амура) в озеро Шарташ для улучшения его рекреационных и водохозяйственных свойств нецелесообразно.

Заключение

Представленный выше материал показывает, что выбор методов улучшения состояния водоемов, в том числе и биоманипуляций, является достаточно ответственной и сложной операцией, базирующейся на понимании сущности происходящих внутриводоемных процессов, на информации, позволяющей составить адекватный баланс загрязняющих и биогенных веществ и пр.

Каждый водоем требует индивидуального подхода, базирующегося на общей методологии выбора оптимальных восстановительных мероприятий для конкретных водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработать методы восстановления и мелиорации зарастающих водоемов. Отчет по НИР. УралНИИВХ, 1983 г. Научный руководитель А.Н. Попов, № гос. регистрации 81066552.
2. *Денисова А.И.* Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования. — Киев: Наукова думка, 1979. — 229 с.
3. *Бульон В.В.* Первичная продукция фитопланктона внутренних водоемов. — Л.: Наука, 1983. — 141 с.